



Cells alive system 냉동방식이 숙성된 한우 앞다리살에 미치는 영향

이혜윤^{1,†} · 전경학^{1,†} · 김영재² · 천지연^{1,*}¹제주대학교 식품생명공학과, ²솔트바이펩

Effects of the cells alive system (CAS) freezing on aged Hanwoo shoulder clod

Hye-Yoon Yi^{1,†}, Kyeong-Hak Jeon^{1,†}, YeongJae Kim² and Ji-Yeon Chun^{1,*}¹Department of Food Bioengineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea²Saltbypeb, Jeju 63245, Korea

Abstract

This study evaluated the effects of the cells alive system (CAS) freezing method and different thawing methods (refrigeration and running water) on the quality of aged Hanwoo shoulder clods. Thawing time was significantly influenced by the thawing method, with running water thawing taking 3 h and refrigeration thawing exceeding 20 h. CAS freezing yielded significantly higher lightness (L*) values during running water thawing than it did during general freezing ($p < 0.05$), likely owing to reduced water loss. CAS-frozen meat exhibited lower volatile basic nitrogen levels and thawing loss (2.05%–2.11%) compared with that of general frozen meat (3.17%–3.79%), indicating superior freshness and reduced quality deterioration ($p < 0.05$). Among the textural properties, springiness was highest in frozen and running water-thawed CAS meat (10.5 mm). In contrast, general freezing combined with refrigeration thawing caused the greatest quality degradation, as reflected by the lowest pH (5.45) and water holding capacity (86.36%), and highest cooking loss (32.98%). These results suggest that CAS freezing combined with running water thawing minimizes changes in quality and enhances springiness, making it an optimal approach for the production of high-quality aged meat.

Keywords: Cells alive system, Freezing, Thawing, Aged beef, Quality

서론

냉동기술은 식품 유통 과정 중 발생 가능한 물리적·미생물학적 품질 변화를 억제하기 위한 수단으로 널리 사용되고 있다(Hong, 2019). 특히 육류나 수산물과 같이 수분, 단백질, 지방 등의 함량이 높아 미생물 증식과 산화로 인한 변패가 쉽게 발생하는 식품을 냉동 보관하면 오랜 기간 신선도를 유지할 수 있다(Shim et al., 2015; Chun et al., 2016). 식품의 냉동 방식은 온도에 따른 속도로 구분 지을 수 있으며, 동결과정 중 약 $-5 \sim 0^\circ\text{C}$ 부근인 최대 빙결정 형성 구간(maximum ice crystal formation zone)을 빠르게 통과하는 급속

냉동은 냉동식품의 품질 변화를 최소화하는 것으로 보고되고 있다(Im et al., 2022; Kim et al., 2022).

급속냉동은 -40°C 이하의 저온에서 단시간 내에 식품을 얼리는 기술로, 세포나 조직에 미세한 얼음 결정만을 형성하여 구조적 손상을 방지함으로써 해동 후에도 식품 본연의 맛과 질감을 유지할 수 있다(Shim et al., 2015; Chun et al., 2016). 작은 크기의 식육은 개별급속냉동(individual quick freezing)에 의하여 빠른 속도로 동결 가능하다. 하지만, 송풍식 냉동기술에 기반하므로 크기에 따라 효과가 제한적이며, 이를 보완하기 위한 새로운 냉동기술의 개발과 적용은 계속되고 있다(Hong, 2019; Hu et al., 2022).

Received: Jan 22, 2025 / Revised: Feb 06, 2025 / Accepted: Feb 12, 2025

Corresponding author: Ji-Yeon Chun, Department of Food Bioengineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

E-mail: chunjiyeon@jejunu.ac.kr[†]These authors contributed equally to this work.

Copyright © 2025 Korean Society for Food Engineering.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

일본의 ABI사에서 개발한 cells alive system (CAS)은 급속동결기 내에 자기장을 발생시켜 물 분자가 진동하여 빙결정의 성장을 억제하고, 식품의 세포 손상을 최소화하는 냉동기술이다(Owada & Kurita, 2001). CAS 냉동은 식품의 세포막에 가해지는 기계적 스트레스를 현저히 낮추므로 해동 후에도 식품의 품질, 조직감, 기능성을 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다(Owada, 2011). 그럼에도 아직까지 국내에서는 CAS 기술을 활용한 냉동식품의 상용화가 활발히 이루어지지 않고 있으며, CAS 기술의 냉동효과에 대한 추가 검증이 필요하다는 의견도 일부 존재한다(Otero et al., 2016; Hong, 2019).

냉동육을 조리 및 섭취하기 위해서는 해동과정이 필수적이며, 이때 해동방법은 최종 제품의 품질에 중대한 영향을 미치게 된다(Park et al., 2006; Chun et al., 2016; Cao et al., 2022). 식품 해동에 보편적으로 사용되고 있는 방법으로는 냉장 해동, 냉수 해동, 유수 해동, 실온 해동, 전자레인지 해동 등이 있으며, 해동 조건은 최종 식품의 품질 특성에 많은 영향을 주게 된다(Shim et al., 2015). 특히, 해동시간이 길어질수록 식품의 미생물 증식과 산패도는 증가하여 품질 저하가 발생할 수 있으므로 적절한 해동 시간을 유지하는 것은 매우 중요하다(Im et al., 2022).

현재까지 냉동 및 해동 조건이 식육 품질에 미치는 영향을 확인하기 위해 수행된 연구로는 해동방법을 달리한 돈육의 이화학적·미생물학적 특성 분석(Park et al., 2012), 한우육의 냉동 및 해동 조건에 따른 품질 변화(Chun et al., 2016), 다양한 해동방법이 냉동육 품질에 미치는 영향 확인(Gan et al., 2022), 다양한 냉동 및 해동 속도가 숙성 양고기 등심의 품질 특성에 미치는 영향 확인(Kim et al., 2024) 등이 있다. 하지만 아직까지 CAS 냉동이 식품 품질에 미치는 영향을 확인한 연구는 미비한 실정이다.

소고기는 각 부위별 육질과 맛의 차이가 커서 소비자의 선호도도 다르게 나타난다. 일반적으로 구이용으로 많이 활용되는 안심, 등심, 채끝을 제외한 앞다리, 양지, 목심, 우둔, 설도, 사태 등은 비선호 부위로 분류된다(Chungbuk National University, 2019). 이중 한우 앞다리살은 지방 함량이 낮고 조직이 단단하여 소비자의 선호도가 낮은 것으로 보고되고 있다(Kim, 2020). 최근, 한우 앞다리살을 포함한 비선호 부위는 부위를 세분화하고, 각 부위별 특성에 맞는 조리법을 개발함으로써 소비자 접근성을 높이기 위한 시도들이 이어지고 있다(Kim et al., 2021). 또한, 낮은 등급 또는 비선호 부위의 식육에 딥에이징 기술을 적용하여 감칠맛과 연도를 향상시켜 부가가치를 창출함으로써 부위별 수급 불균형을 개선하기 위한 연구도 증가하고 있다(Kim, 2020).

본 연구에서는 숙성된 한우 앞다리살의 CAS 냉동 기술을 적용하였으며, 냉장해동과 유수해동에 따른 품질 차이를 관찰하여 숙성 한우 앞다리살의 품질 변화를 최소화하는 냉동 및 해동 방법을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 연구에서 사용된 모든 시료는 사전연구(Jeon et al., 2023)에서 확립된 조건(냉수침지법, 1°C, 40일)으로 숙성된 한우 앞다리살(Saltbyeb, Jeju, Korea)을 사용하였다. 냉수침지법으로 40일 숙성된 한우 앞다리살의 품질 특성은 Table 1 및 Table 2와 같다.

숙성된 육류는 CAS 냉동고(Cells Alive System machine Batch type, ABI Co., Ltd., Chiba, Japan)와 일반 냉동고(IBK-500F, Infobio-tech, Daejeon, Korea)를 사용하여 냉동 처리하였다. CAS 냉동고는 시료의 심부 온도가 -20°C에 도달할 때까지 CAS 냉동고(-44±1°C)에서 냉동되었고, 대조군은 일반 냉동고(-21±1°C)를 사용하여 동일한 심부 온도(-20°C)에 이를 때까지 냉동하였다. 해동은 유수 해동법과 냉장 해동법으로 수행되었다. 유수 해동은 수온을 17.6±0.5°C, 유속을 138 mm/s로 설정하였고, 해동이 완료되는 기준은 시료의 심부 온도가 4±1°C에 도달하는 시점으로 정하였다. 냉장 해동은 냉장고에서 4±1°C 유지하면서 시료의 심부 온도가 같은 4±1°C에 이를 때까지 진행하였다. 모든 해동이 완료된 시료는 다양한 품질 특성 분석을 위해 실험 재료로 사용되었다.

색도 및 외관

색도는 L*, a*, b* 값을 색차계(TCR200, PCE americas Inc., Jupiter, FL, USA)로 3회 측정하였으며, 이때 표준 백색판의 L*, a*, b* 값은 91.74, 3.01, -13.72이었다. 모든 시료의 외관은 동일한 환경에서 아이폰 14(iPhone 14, Apple, Cupertino, CA, USA)로 촬영하였다.

pH

pH는 시료 5 g에 증류수 20 mL를 가하여 homogenizer (Ultra Turrax T25, IKA, Braun, Germany)로 7,000 rpm에서 1분간 균질화한 후 pH-meter (Five-Easy Plus F20 pH/mV, Mettler Toledo, Greifensee, Switzerland)를 이용하여 3회 반복 측정하였다.

휘발성 염기 질소(volatil basic nitrogen, VBN) 함량

휘발성 염기 질소 화합물 측정은 식품공전의 Conway 미량 확산법(MFDS, 2024)을 변형하여 측정하였다. 시험용액 조제는 시료 10 g (W)과 증류수 50 mL (d)를 혼합하여 30분간 침출 교반한 후 여과하였다. 5% 황산 용액을 이용하여 여과액을 약산성으로 중화시킨 다음, 증류수를 넣어 일정량을 시험용액으로 사용하였다. 확산은 여

과액 1 mL를 Conway 용기 외실 왼쪽에 취하고, 내실에는 0.01 N H₂SO₄ (Daejung chemical & metals Co. Ltd., Siheung, Korea) 1 mL를 취한 뒤, 외실 오른쪽에 K₂CO₃ (potassium carbonate anhydrous, Daejung chemical & metals Co. Ltd.) 포화용액 1 mL를 취하여 기밀제를 바른 뚜껑을 닫았다. 여과액과 K₂CO₃ 포화용액이 잘 섞이게 해준 뒤, 25℃에서 60분간 정치하였다. 정량은 Conway의 뚜껑을 열어 Brunswick 시액 (methyl red & methyl blue, Daejung chemical & metals Co. Ltd.) 10 μL를 내실에 취한 뒤, 0.01 N NaOH (sodium hydroxide, Daejung chemical & metals Co. Ltd.) 용액으로 적정하여 소모되는 양(a)을 측정하였다. 공시험은 증류수를 사용하였고, 2회 평균치를 구하여 다음의 식에 의해 계산하였다.

$$VBN(mg\%) = 0.14 \times \frac{(b - a) \times f}{W} \times 100 \times d$$

- a: 검체에 대한 평균 0.01 N NaOH 소비량(mL)
- b: 공시험에 대한 0.01 N NaOH 소비량(mL)
- d: 검체의 희석배수(mL)
- f: 0.01 NaOH 역가
- W: 검체의 채취량(g)
- 0.14: 0.01 N HCl 용액의 1 mL에 상응하는 휘발성 염기질소량(mg)

보수력(water holding capacity, WHC)

보수력은 Wierbicki & Deatherage (1958)의 방법을 변형하여 측정하였다. 15 mL test tube에 건조된 거즈를 넣은 후, 거즈 위에 시료 1 g을 취하였다. 그 후, 10℃로 설정한 원심분리기(LaboGene 1248R, Gryozen, Daejeon, Korea)에서 1,763×g으로 10분간 원심분리하였다. 원심분리 후 시료를 제거하고 test tube의 무게를 측정한 뒤, 다음의 식에 의해 보수력을 계산하였다.

$$WHC(\%) = \frac{W_1 - (W_3 - W_2)}{W_1} \times 100$$

- W₁: 시료 무게(g)
- W₂: 빈 test tube 무게(g)
- W₃: 시료 제거 후 test tube 무게(g)

가열감량(cooking loss)

가열감량은 50 mL test tube에 시료 30 g을 충전한 뒤 항온수조 (Material Scientific Co., Seoul, Korea)에서 중심부의 온도가 85℃가 될 때까지 가열하였다. 가열 후 상온에서 30분간 냉각과정을 거친 다음, test tube의 액체를 제거하여 무게를 측정한 후 다음의 식에 의해 가열감량을 계산하였다.

$$Cookingloss(\%) = \frac{B - C}{B - A} \times 100$$

- A: 빈 test tube 무게(g)
- B: 가열 전 test tube 무게(g)
- C: 가열 후 test tube 무게(g)

해동감량(thawing loss)

해동이 완료된 시료를 종이타월로 표면 물기를 제거한 후 무게를 측정하였으며, 아래의 식을 이용하여 해동감량을 나타내었다. 각 시료를 3회 반복 측정하여 평균값으로 나타내었다.

$$Thawing\ loss(\%) = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

- A: 해동 전 시료의 무게(g)
- B: 해동 후 시료의 무게(g)

조직감(texture profile analysis, TPA)

조직감은 Moon et al. (2021)의 방법을 일부 변형하여 측정하였다. 시료를 직경 20 mm×두께 20 mm의 크기로 성형한 후, texture analyzer (CT3 10K, Brookfield Engineering Laboratories, Inc. Middleboro, MA, USA)로 측정하였다. 직경 25.4 mm, 두께 35 mm의 cylinder type TA11/1000 probe를 장착하였고, 측정조건은 deformation 50%, pre-test speed 2.00 mm/s, test speed 2.0 mm/s, post-test speed 2.0 mm/s, trigger load 3.0 g으로 설정하였다. 경도(hardness), 부착성(adhesiveness), 응집성(cohesiveness), 탄력성(springiness), 씹힘성(chewiness)을 10회 반복 측정하였다.

통계처리

모든 실험은 최소 3회 이상 반복하였으며, 결과는 평균±표준편차로 나타내었다. 통계처리는 Minitab 18 (Minitab Inc., State College, PA, USA)을 이용하여 일원분산분석(one-way ANOVA) 후, 각 시료의 유의성 검정을 위해 Tukey의 다중검정법(Tukey's multiple range test)을 이용하여 p<0.05 수준에서 사후검정을 실시하였다.

결과 및 고찰

냉동숙성육의 해동곡선

일반냉동고(general freezing, GF)와 CAS 냉동고를 이용하여 냉동된 숙성육을 각각 유수해동법(running water thawing, RWT)과 냉

장해동법(refrigeration thawing, RT)을 이용하여 해동하면서 시료 중심부의 온도를 측정한 결과는 Fig. 1과 같다. 우수해동하였을 때 냉동방법과 관계없이 3시간 이내에 시료 중심부가 4°C가 되어 냉동속성육의 해동이 완료되었으며, 냉장해동 시에는 GF 속성육이 21.5시간, CAS 속성육이 약 25시간 소요되어 해동이 완료되었다. 결과적으로 냉동속성육의 해동시간은 냉동방법에 의한 영향보다 해동방법에 따른 차이를 보였다. Jo et al. (2014)은 한우를 -24°C(일반냉동고), -45°C(air blast freezer), -100°C(liquid nitrogen cryogenic freezer)로 냉동 후 해동방법을 달리하였을 때, 냉동 한우의 해동시간은 우수해동법이 자연해동법보다 더 빨랐다고 보고하여 본 연구와 유사한 경향을 보였다. 반면, Shim et al. (2015)의 연구에서 표고버섯의 냉동방법(급속 및 완만)과 해동방법(자연, 우수, 초음파, 전자기인자)을 달리하였을 때 냉동방법에 관계없이 우수해동은 자연해동보다 해동시간을 단축시켰으며, 이는 흐르는 물의 열전도도가 높은 것에 따른 결과로 분석하였다. 하지만, 표고버섯의 해동시간은 냉동 방법 또한 영향을 미쳤다고 보고하여 본 연구와는 다른 경향을 보이기도 하였다. 이는 단순히 냉동방법뿐만 아니라, 원물의 종류 내지는 냉동 시 전자기장 결합 여부와 같은 변수들이 해동시간에 영향을 주었기 때문으로 사료된다.

색도 및 외관

소비자들은 식육 구매 시 품질 고려요인으로 육색, 신선도, 냉장 여부 등을 중요하게 여기므로 식육의 색과 외관은 품질을 평가하는데 중요한 지표로 작용한다(Shin, 2020). 냉동 전 속성 한우 앞다리살의 L*, a*, b*값은 각각 42.51, 18.40, 1.02였으며(Table 1), 냉동과 해동 방법을 달리한 속성 한우 앞다리살의 색도와 외관은 각각 Table 3과 Fig. 2에 나타내었다. 냉·해동 처리 후 속성육의 a*값(28.12~29.21)과 b*값(1.85~3.21)은 냉동 전(a*: 18.40, b*: 1.02)보다 높은 값을 보였으나, L*값은 냉동 전(42.51)과 냉·해동 처리군

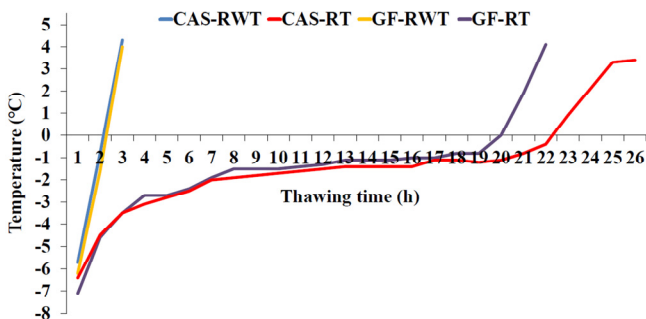


Fig. 1. Thawing curve of frozen aged beef shoulder clod according to thawing method (CAS: cells alive system freezing, GF: general freezing, RWT: running water thawing, RT: refrigeration thawing).

Table 1. Physicochemical properties of fresh and 40 days-aged beef shoulder clod

Traits ¹⁾	Fresh meat	40 days aged meat	
Color	L*	39.57±1.65 ^{2b3)}	42.51±0.48 ^a
	a*	31.03±1.42 ^a	18.40±1.01 ^b
	b*	0.74±0.06 ^b	1.02±0.07 ^a
pH	5.25±0.10 ^a	4.91±0.03 ^b	
WHC (%)	95.16±0.44 ^a	93.32±0.39 ^b	
VBN (mg%)	-	8.05±0.49	

¹⁾WHC: water holding capacity, VBN: volatile basic nitrogen
²⁾Data are expressed as the means±standard deviation (SD).
^{3)a,b)}Means±SD within the same row with different superscript letters differ significantly at $p < 0.05$.

Table 2. Texture properties of fresh and 40 days-aged beef shoulder clod

Traits	Fresh meat	40 days aged meat
Hardness cycle 1 (N)	2.76±0.85 ^{1b2)}	10.07±5.34 ^a
Hardness cycle 2 (N)	2.10±0.67 ^b	7.81±4.09 ^a
Adhesiveness (mJ)	0.43±0.06 ^b	1.06±0.33 ^a
Cohesiveness	0.43±0.03 ^a	0.40±0.04 ^a
Springiness (mm)	5.43±0.50 ^a	5.60±1.06 ^a
Chewiness (mJ)	6.63±3.01 ^a	23.26±13.94 ^a

¹⁾Data are expressed as the means±standard deviation (SD).
^{2)a,b)}Means±SD within the same row with different superscript letters differ significantly at $p < 0.05$.

(40.74~43.98) 간에 뚜렷한 차이를 보이지 않았었다(Table 3). 냉동 및 해동 방법에 따른 속성육의 색도값에서 a*값은 처리구 간의 유의적인 차이를 보이지 않았으나($p > 0.05$), L*값과 b*값은 유의적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 특히, 우수해동(RWT) 시 CAS 냉동이 일반냉동(GF)보다 유의적으로 높은 L*값을 나타내었다($p < 0.05$). 식육의 색상은 고기 색소 단백질, 미오글로빈, 수분함량, 보수력과 같은 여러 요인에 의해 변하게 된다(Jo et al., 2014). 일반적으로 냉·해동 처리를 거치게 되면 식육의 표면 산화에 의한 변색이 발생하게 되며, 이때 변색 정도는 냉·해동 처리 조건과 방식에 따른 차이를 보이는 것으로 알려져 있다(Ko, 2011). Hu et al. (2023)은 다양한 해동방법이 냉동 돈육의 색 품질에 미치는 영향을 확인하였으며, 적외선과 마이크로파 해동방법을 병행하였을 때 신선육과 가장 유사한 색상을 나타내었다고 보고하였다. Aroeira et al. (2017)은 냉·해동 처리를 거친 소고기는 수분이 세포 외로 빠져나가면서 세포 내에 헴(heme) 색소가 상대적으로 고농도 존재하므로 원래보다 어두운 색상(낮은 L*값)을 나타낸 것으로 판단하였다. 냉동과 해동 방법을 달리한 속성 한우 앞다리살의 외관을 보았을 때 우수해동(RWT) 시 일반냉동(GF) 처리군에서 CAS 냉동 처리군보다 더 많은 양의 수분이 식육 표면에 존재하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 따라서, 본 연구에서 속성 한우 앞다리살을 CAS 냉동한 것보다 일반냉동

Table 3. Color of aged beef shoulder clod according to freezing and thawing method

color	Freezing-thawing method			
	CAS ¹⁾ -RWT ²⁾	CAS-RT	GF-RWT	GF-RT
L*	43.11±0.98 ^{3)ab4)}	41.93±0.40 ^{bc}	40.74±0.32 ^c	43.98±1.14 ^a
a*	29.21±1.71 ^a	28.12±0.35 ^a	29.03±0.78 ^a	29.03±1.04 ^a
b*	3.02±0.75 ^a	3.17±0.32 ^a	1.85±0.78 ^b	3.21±0.13 ^a

¹⁾CAS: cells alive system freezing, GF: general freezing
²⁾RWT: running water thawing, RT: refrigeration thawing
³⁾Data are expressed as the means±standard deviation (SD).
^{4)a-c}Means±SD within the same row with different superscript letters differ significantly at $p < 0.05$.

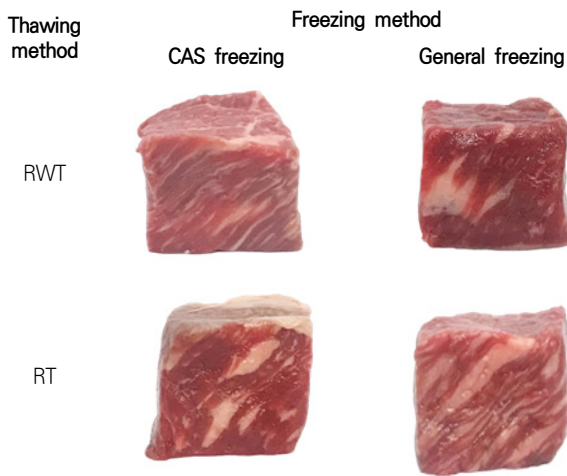


Fig. 2. Appearance of aged beef shoulder clod according to freezing and thawing method (RWT: running water thawing, RT: refrigeration thawing).

(GF)하였을 때 더 낮은 L*값을 나타낸 것은 더 많은 양의 수분이 세포 외부로 빠져나간 것에 따른 결과로 사료된다.

pH

식육의 pH는 육색, 보수력, 다즙성, 연도, 조직감, 신선도 등 다양한 품질 특성과 밀접한 관련이 있어 식육 품질 판정에 중요한 지표로 사용된다(Kim, 2022). 또한, 식육의 pH는 전처리, 조리방법, 숙성 및 냉·해동 조건에 의해서도 변화하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2015; Kim et al., 2018). 본 연구에서 냉동과 해동 방법을 달리한 숙성 한우 앞다리살의 pH는 Table 4에 나타내었다. 냉·해동 처리 후 식육의 pH는 5.45~5.66의 범위를 나타내어 냉동 전 숙성육(4.91)보다 모두 높아진 것으로 확인되었다. 또한, 냉·해동 처리 후 숙성육의 pH는 일반냉동-냉장해동(GF-RT) 시 유의적으로 가장 낮은 값(5.45)을 보였다($p < 0.05$). 일반적으로 냉·해동 처리 후 식육의 pH는 냉동 전보다 높거나 낮을 수 있으며, 이는 냉·해동 방법 및 조건과 관련이 있다(Jo et al., 2014). pH의 증가는 저온 변성(cold

denaturation), 감소는 수소 이온 방출에 따른 결과로 보고되고 있다 (Meersman et al., 2006; Leygonie et al., 2011). Kim et al. (2024)은 숙성 양고기의 pH는 냉동 및 해동 속도에 따른 유의미한 변화를 나타내지 않았다고 보고하였다. Hu et al. (2023)은 냉동육을 해동하면 근육에 있는 무기질 성분과 저분자 단백질 혼합물이 물과 함께 빠져 나가면서 용질 농도가 증가함에 따라 pH는 감소한다고 보고하였다. 따라서, 본 연구에서 GF-RT 처리군의 유의적으로 낮은 pH는 냉·해동에 따른 변성 정도가 가장 심하였기 때문으로 해석할 수 있다. 결과적으로 본 연구에서는 CAS 냉동과 우수해동(RWT) 처리가 일반냉동(GF) 및 냉장해동(RT)보다 숙성육의 pH 감소를 억제할 수 있는 것으로 생각된다.

휘발성 염기 질소(VBN) 화합물

휘발성 염기 질소(volatile basic nitrogen, VBN) 함량은 동물성 단백질의 변패 정도를 확인하는 지표로서 육류의 신선도 판단에도 널리 사용되고 있다(Kang & Chun, 2023). 냉동 및 해동 방법에 따른 숙성 한우 앞다리살의 VBN 함량은 Table 4와 같다. 냉동 전 숙성육의 VBN값은 8.05 mg%이었으며(Table 1), 냉·해동 처리 후에는 8.28~10.15 mg%의 범위를 보여 냉동 전보다는 모두 높은 값을 나타내었다(Table 4). 특히, GF-RT(일반냉동-냉장해동) 처리 시 가장 높은 10.15 mg%로 나타났다. 그럼에도 모든 처리구들은 식품공전에서 규정하고 있는 포장육의 휘발성 염기 질소 함량 규격인 20 mg% 이하로 검출되어 신선한 상태를 유지할 수 있음을 확인하였다(MFDS, 2024). 냉동 및 해동 방법에 따라라도 숙성육의 VBN 값은 차이를 보였으며, 특히 동일한 방법으로 해동하였을 때 CAS 냉동은 일반냉동(GF)보다 유의적으로 낮은 VBN 값을 나타내어 냉동방법이 숙성육의 신선도에 유의미한 영향을 줄 수 있음을 확인하였다($p < 0.05$). 반면, 냉동 숙성육의 우수해동(RWT)처리는 냉장해동(RT)보다 낮은 VBN 값을 나타내었으나, 유의미한 차이를 보이지는 않았다($p > 0.05$). Zhang et al. (2023)은 신선한 소고기를 냉장(4℃) 보관하면서 자기장(2 mT)에 노출시키고, 이에 대한 휘발성 염기 질소 함량을 확인하였는데, 처리군은 대조군보다 낮은 VBN값을 유지하

Table 4. pH and volatile basic nitrogen (VBN) of aged beef shoulder clod according to freezing and thawing method

Traits	Freezing-thawing method			
	CAS ¹⁾ -RWT ²⁾	CAS-RT	GF-RWT	GF-RT
pH	5.64±0.02 ^{3)ab4)}	5.66±0.01 ^a	5.66±0.04 ^a	5.45±0.03 ^b
VBN (mg%)	8.28±0.52 ^c	8.63±0.83 ^{bc}	9.54±0.73 ^{ab}	10.15±0.39 ^a

¹⁾CAS: cells alive system freezing, GF: general freezing
²⁾RWT: running water thawing, RT: refrigeration thawing
³⁾Data are expressed as the means±standard deviation (SD).
^{4)a-c}Means±SD within the same row with different superscript letters differ significantly at $p < 0.05$.

였으며, 이는 자기장이 냉장 보관 중 육류의 단백질 산화를 억제하고 단백질 분해를 지연시킴으로써 육류의 냉장 보관 품질을 개선할 수 있기 때문이라고 보고하였다. 반면, Kim & Chin (2021)은 냉동 온도(-30℃와 -70℃)를 달리하여 저장한 돼지고기의 VBN값은 처리구 간의 유의미한 차이를 보이지 않았다고 하여 본 연구와는 다른 경향을 보였다. 그럼에도 본 연구에서 CAS 냉동이 일반냉동보다 육류의 품질 저하를 억제하는데 효과적인 결과를 보인 것은 자기장을 발생시켜 물 분자를 미세하게 진동시키는 CAS 냉동이 식육의 품질 유지에 영향을 주었기 때문으로 사료된다.

보수력

보수력이란 식육에 절단, 분쇄, 압착, 열처리 등의 물리적인 힘을 가하였을 때 식육 내의 수분을 보유해내는 능력을 의미한다(Kim, 2022). 보수력은 식육의 외관, 색상, 다즙성, pH 등과 밀접한 관련이 있다(Lee, 2020). 냉동 및 해동 방법에 따른 숙성 한우 앞다리살의 보수력은 Table 4에 나타내었다. 냉동 전 숙성육의 보수력은 93.32%로 신선육(95.16%)보다는 낮은 값을 보였다(Table 1). 냉·해동 처리 후 숙성육의 보수력은 86.38~90.15%로 냉동 전 숙성육보다 감소한 결과를 보였다(Table 5). 냉동 및 해동 방법에 따른 숙성육의 보수력은 일반냉동-냉장해동(GF-RT)에서만 유의적으로 낮은 값(86.38%)을 보였으며($p<0.05$), 나머지 조건에서는 모두 89% 이상의 값을 나타내었다. 냉·해동 처리 후 숙성육의 pH 결과에서도 GF-RT만 유의적으로 낮은 것으로 나타나, pH와 보수력은 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다(Table 4와 5). 냉동육은 근원섬유 내에 빙결정 형성으로 미오신 구조가 파괴되고, 단백질 변성으로 인해 보수력이 감소하게 된다(Moon, 2013). Chun et al. (2016)은 한우육의 냉동(강제송풍식과 에탄올침지식) 및 해동(냉장 및 유수) 방법과 횡수(1회와 3회)에 따른 보수력 변화를 확인하였으며, 냉동 및 해동 방법보다 횡수가 식육의 보수력에 유의미한 영향을 주었다고 보고하였다. Park et al. (2006)은 초고압 세기(0.1~200 MPa)를 달리하여 15℃에서 냉

동육을 해동하였을 때의 품질 변화를 관찰하였으며, 대조군 대비 100 MPa까지 초고압 세기를 높여줄수록 해동육의 pH와 보수력 모두 유의적으로 증가하여 본 연구와 유사한 경향을 보였다($p<0.05$).

가열감량

식육을 가열하게 되면 단백질과 물 분자 사이의 결합력 변화로 수분 손실이 발생하게 되며, 이는 단백질 변성과 함께 식육 구성성분, pH, 이온, 보수력 등에 의해 결정된다(Lee, 2020). 가열감량 정도는 식육의 세포 및 조직 구조의 손상 정도와도 관련성이 있다(Gan et al., 2022). 냉동 및 해동 방법에 따른 숙성 한우 앞다리살의 가열감량은 Table 5와 같다. CAS-RWT, CAS-RT, GF-RWT의 가열감량은 21.49~23.45%의 범위를 보이며, 처리구 간의 유의적인 차이를 보이지 않았다($p>0.05$). 반면, 일반냉동-냉장해동(GF-RT)의 가열감량은 32.98%로 유의적으로 가장 높은 값을 보였다($p<0.05$). 이는 숙성육 GF-RT 처리 시 가장 낮은 pH 및 보수력을 보인 것과 관련이 있는 것으로 생각된다. Kim et al. (2013)의 연구에서 냉동방법(송풍식 및 전기자장)에 따른 식육의 가열감량 차이는 관찰되지 않았으며, 식육의 지방 함량이 높은 부위일수록 더 낮은 가열감량을 보여 냉동방법보다는 식육의 부위가 가열감량에 유의미한 영향을 준다고 하였다. 또한, Yu et al. (2005)은 해동온도(0, 2, 18℃)에 따른 냉동계육의 유의미한 가열감량 차이는 확인되지 않았다고 하였다. 결과적으로, 본 연구에서도 냉동 및 해동 방법이 식육의 가열감량에 직접적인 영향을 주지는 않는 것으로 확인되었다. 그럼에도 GF-RT보다는 CAS 냉동과 유수해동(RWT) 중 1가지 이상의 방법을 적용하는 것이 식육의 가열감량을 낮추는데 효과적인 것으로 생각된다.

해동감량

해동이란 냉동식품에 열을 가하여 식품 내부에 존재하는 얼음 결정을 액체 상태로 전환시키는 과정을 의미한다(Im et al., 2022). 냉동은 원료 및 식품 자체가 가지고 있는 영양, 향미, 품질을 보존하는데 효과적인 기술이지만, 해동과정에서 필연적으로 발생하는 드립(drip) 현상은 품질 저하의 주요 원인이 된다(Kim et al., 2022). 드립의 양을 확인할 수 있는 해동감량은 냉·해동 후의 품질을 판단할 수 있는 지표로 활용되고 있다(Gan et al., 2022). 냉동 및 해동 방법에 따른 숙성 한우 앞다리살의 해동감량은 Table 5에 나타내었다. 숙성육의 해동감량은 CAS 냉동(2.05~2.11) 시 일반냉동(3.17~3.79)보다 유의적으로 낮은 값들을 나타내었다($p<0.05$). 반면, 숙성육의 해동감량은 해동 방법에 따른 차이를 보이지는 않아, 해동 방법은 해동감량에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다($p>0.05$). Chun et al. (2016)은 냉동 및 해동 방법은 한우육의 해동 감량에 영향을 주었다고 하였으며, 특히 급속냉동(2.09~2.59%)은 완만냉동(4.02~4.54%)보다 낮은

Table 5. Water holding capacity (WHC), cooking loss, and thawing loss of aged beef shoulder clod according to freezing and thawing method

Traits	Freezing-thawing method			
	CAS ¹⁾ -RWT ²⁾	CAS-RT	GF-RWT	GF-RT
WHC (%)	89.74±0.77 ³⁾⁴⁾	89.97±1.09 ^a	90.15±1.56 ^a	86.38±3.08 ^b
Cooking loss (%)	21.49±1.51 ^b	22.69±1.99 ^b	23.45±2.53 ^b	32.98±1.71 ^a
Thawing loss (%)	2.05±0.16 ^b	2.11±0.17 ^b	3.17±0.34 ^a	3.79±0.59 ^a

¹⁾CAS: cells alive system freezing, GF: general freezing
²⁾RWT: running water thawing, RT: refrigeration thawing
³⁾Data are expressed as the means±standard deviation (SD).
^{4)a,b}Means±SD within the same row with different superscript letters differ significantly at $p<0.05$.

해동 감량을 나타내었다고 보고하였다. Hu et al. (2023)은 냉동돈육의 해동방법을 달리하였을 때, 자연해동(5.37%) 시 가장 높은 해동감량을 나타내었으며, 마이크로파(3.57%), 적외선(2.69%), 적외선 및 마이크로파(1.92%) 처리 시 유의적으로 낮은 해동감량을 보였다고 하여 본 연구와는 다른 경향을 보였다($p < 0.05$). 일반적으로 해동감량은 냉동조건에 따른 빙결정의 수와 크기, 세포의 손상 정도와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Ko, 2011; Chun et al., 2016). 식육을 낮은 온도에서 얼릴수록 빙결정의 크기는 작게 형성되며, 이는 식육의 해동감량 및 가열감량을 낮추는데 효과적인 것으로 알려져 있다(Ko, 2011; Kim et al., 2022). 결과적으로 본 연구를 통해 조직의 세포를 파괴하지 않는 CAS 냉동 기술은 숙성육의 해동감량을 낮추는데 효과적인 것을 확인하였다.

조직감

조직감은 식육의 구조와 식감 인식의 차이를 예측할 수 있는 특성으로, 소비자 선호도에도 직접적인 영향을 주는 중요한 요인 중 하나이다(Wilkinson et al., 2000). 냉·해동과정에서 발생하는 육류의 구조 변화와 해동 후 근육 조직의 파괴, 단백질 변성, 지질 산화 등은 식육의 조직감 특성과 관련이 있다(Gan et al., 2022). 식육의 물성 변화를 확인하기 위하여 고체 시료의 단단한 정도를 의미하는 경도(hardness), 표면이나 물질에 들러붙는 성질인 부착성(adhesiveness), 조직 간 결합 정도를 나타내는 응집성(cohesiveness), 외부의 힘에 의해 변형이 가해진 후 원래의 상태로 되돌아가려는 탄력성(springiness), 고체 식품을 삼킬 수 있을 정도로 씹는데 필요한 힘인 씹힘성(chewiness)과 같은 성질들이 주로 평가된다(Ko, 2011; Kim et al., 2017). 냉동 및 해동 방법에 따른 숙성 한우 앞다리살의 조직감 결과는 Table 6과 같다.

경도 1(hardness 1)의 경우, 냉동 전 숙성육에서 10.07 N(Table 2)으로 나타났으며, 냉·해동 처리 후에는 GF-RT에서 가장 높은 10.94 N ($p < 0.05$), 나머지 처리구들은 4.40~6.21 N의 범위를 보였다. 이러한 경향성은 경도 2에서도 유사하게 관찰되었다(Table 6). Ko (2011)의 연구에서 식육의 가열 및 해동 감량이 상대적으로 낮게 나타난 전자기장 및 침지식 급속냉동 방식이 송풍식 냉동방식보다 낮은 경도값을 보였으며, 이는 급속냉동방식이 냉동 시 조직의 손상 정도를 줄임으로써 해동 후에 수분 손실을 적게 하여 신선육과 유사한 특성을 나타낸 것으로 보고하였다. Kim et al. (2017)은 냉동 돈육 초음파 해동처리 시 주파수에 따른 경도값의 변화는 관찰되지 않았으며, 이는 급속냉동 후 빠른 해동으로 인하여 조직 손상 및 드립 발생이 최소화되어 신선육과 유사한 품질을 유지할 수 있었다고 보고하였다. 일반적으로, 해동 과정에서 근육의 근원섬유 단백질 변성 및 근육 내부 조직 구조의 변화로 인해 식육의 경도는

Table 6. Texture properties of aged beef shoulder clod according to freezing and thawing method

Physical properties	Freezing-thawing method			
	CAS ¹⁾ -RWT ²⁾	CAS-RT	GF-RWT	GF-RT
Hardness Cycle 1 (N)	5.67±1.59 ³⁾⁴⁾	4.40±1.01 ^b	6.21±1.87 ^b	10.94±3.10 ^a
Hardness Cycle 2 (N)	4.55±1.46 ^b	3.30±0.78 ^b	4.51±1.46 ^b	8.05±2.35 ^a
Adhesiveness (mJ)	3.79±2.87 ^a	1.47±0.34 ^b	2.24±1.60 ^{ab}	1.65±0.95 ^b
Cohesiveness	0.34±0.05 ^a	0.34±0.03 ^a	0.32±0.04 ^a	0.36±0.03 ^a
Springiness (mm)	10.50±1.47 ^a	7.26±1.14 ^b	8.32±1.59 ^b	8.71±1.51 ^b
Chewiness (mJ)	29.64±11.47 ^a	10.41±2.83 ^b	17.78±7.87 ^b	31.61±9.02 ^a

¹⁾CAS: cells alive system freezing, GF: general freezing
²⁾RWT: running water thawing, RT: refrigeration thawing
³⁾Data are expressed as the means±standard deviation (SD).
^{4)a,b}Means±SD within the same row with different superscript letters differ significantly at $p < 0.05$.

증가하는 것으로 알려져 있다(Zhang et al., 2017; Hu et al., 2023).

냉동 및 해동 방법을 달리한 숙성육의 부착성(adhesiveness)은 1.47~3.79 mJ의 범위를 보였으며, CAS 냉동 시 유수해동(3.79 mJ)이 냉장해동(1.47 mJ)보다 유의적으로 높은 부착성을 가지는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 또한, 숙성육 일반냉동 시에도 유수해동(2.24 mJ)이 냉장해동(1.65 mJ)보다 높은 부착성을 보였다. Gan et al. (2022)은 다양한 해동방법(마이크로파, 초음파, 적외선, 상온)이 냉동육의 부착성에 미치는 영향을 확인하였으며, 초음파 해동 시 식육의 부착성이 가장 높게 나타난 것은 초음파 처리방법의 해동 속도가 빠르고 해동과정 동안 수분을 안정적인 범위로 유지할 수 있었기 때문으로 보고하였다.

본 연구에서 냉동 및 해동 방법을 달리한 숙성육의 응집성(cohesiveness)은 0.32~0.36의 범위로 나타났으며, 처리구 간의 유의미한 차이를 보이지는 않았다($p > 0.05$). 이를 통해 본 연구에서 처리한 냉동(CAS와 GF) 및 해동(RWT와 RT) 방법은 숙성육의 조직 간 결합 정도에 유의미한 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

숙성육의 탄력성(springiness)은 냉동 전(5.60 mm)보다 냉·해동 처리 후(7.26~10.50 mm)에 모두 더 높은 값을 보였다. 냉동 및 해동 방법에 따른 결과에서 CAS 냉동-유수해동(CAS-RWT) 시 숙성육의 탄력성이 유의적으로 가장 높은 값(10.50 mm)을 나타내었다($p < 0.05$). 일반적으로 냉동 기간이 길어질수록 식육의 품질은 떨어지게 되는데 이때 식육의 경도는 증가하고 탄력성은 감소하며, 이는 얼음 결정의 승화 및 젤라틴 구조의 탈수에 따른 것으로 알려져 있다(Wu et al., 2021; Luo et al., 2023). 따라서 본 연구를 통해 CAS-RWT는 숙성육의 품질 변화를 최소화할 수 있는 냉·해동 방법으로 생각된다.

요약

본 연구에서는 CAS 냉동과 일반냉동, 우수해동과 냉장해동이 숙성 한우 앞다리살 품질에 미치는 영향을 확인하였다. 냉동숙성육의 해동시간은 냉동방법보다 해동방법에 따른 유의미한 차이를 나타내어 우수해동 시 3시간, 냉장해동 시 20시간 이상 소요됨을 확인하였다. 냉동숙성육 우수해동 시, CAS 냉동이 일반냉동보다 유의적으로 높은 L*값을 나타내었으며($p < 0.05$), 이는 일반냉동처리 시 더 많은 양의 수분이 세포 외부로 빠져 나갔기 때문으로 판단된다. 숙성육을 일반냉동-냉장해동(GF-RT)하였을 때 유의적으로 가장 낮은 pH(5.45)와 보수력(86.36%), 가장 높은 가열감량(32.98%)을 보여 품질의 변화가 많이 일어났음을 확인하였다. 숙성육의 휘발성 염기 질소(VBN) 함량의 경우 CAS 냉동 시 일반냉동보다 유의적으로 낮은 값을 나타내어 CAS 냉동이 숙성육의 신선도 유지에 효과적임을 확인하였다($p < 0.05$). 또한, 숙성육의 해동감량은 CAS 냉동(2.05~2.11) 시 일반냉동(3.17~3.79)보다 유의적으로 낮게 확인되었다($p < 0.05$). 숙성육의 조직감 중 경도 1(hardness 1)은 일반냉동-냉장해동(GF-RT)하였을 때 10.94 N으로 처리구들 중 가장 높은 값을 나타내었고, 탄력성(springiness)은 CAS 냉동-우수해동(CAS-RWT)하였을 때 가장 높은 값(10.50 mm)을 나타내었다. 냉동 숙성육의 해동 후 부착성(adhesiveness)은 우수해동(2.24~3.79 mJ) 시 냉장해동(1.47~1.65 mJ)보다 높은 범위를 나타내었다. 결과적으로 본 연구에서는 CAS 냉동과 우수해동 방법을 조합하였을 때 숙성 한우 앞다리살의 품질 변화를 최소화하고, 높은 탄력성을 지닌 식육으로서 활용 가능할 것이라 생각된다. 그러나 CAS 냉동 기술의 우수성을 입증하기 위해서는 앞으로 보다 다양한 식품군에서의 품질 변화를 심도있게 확인하는 후속연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

ORCID

Hye-Yoon Yi <https://orcid.org/0000-0002-5871-6699>
 Kyeong-Hak Jeon <https://orcid.org/0009-0001-4880-8477>
 Ji-Yeon Chun <https://orcid.org/0000-0002-4336-3595>

Conflict of interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

This research was supported by the 2023 scientific promotion program funded by Jeju National University.

Data availability

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

Authorship contribution statement

Conceptualization: Kim YJ, Chun JY.

Data curation: Yi HY, Jeon KH.

Formal analysis: Yi HY, Jeon KH.

Methodology: Jeon KH, Chun JY.

Validation: Yi HY, Jeon KH.

Investigation: Jeon KH.

Writing - original draft: Yi HY, Chun JY.

Writing - review & editing: Yi HY, Jeon KH, Kim YJ, Chun JY.

Ethics approval

Not applicable.

References

- Aroeira CN, de Almeida Torres Filho R, Fontes PR, Ramos ADLS, de Miranda Gomide LA, Ladeira MM, Ramos EM. 2017. Effect of freezing prior to aging on myoglobin redox forms and CIE color of beef from Nellore and Aberdeen Angus cattle. *Meat Sci.* 125: 16-21.
- Cao Y, Song Z, Han L, Yu Q, Kong X, Li S. 2022. Changes in quality and collagen properties of cattle rumen smooth muscle subjected to repeated freeze-thaw cycles. *Foods* 11: 3338.
- Chungbuk National University. 2019. Aging friendly meat products using low value Hanwoo meat and manufacturing method thereof. Korea patent NO. 1020190091115.
- Chun HH, Choi EJ, Han AR, Chung YB, Kim JS, Park SH. 2016. Changes in quality of Hanwoo bottom round under different freezing and thawing conditions. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 45: 230-238.
- Gan S, Zhang M, Mujumdar AS, Jiang Q. 2022. Effects of different thawing methods on quality of unfrozen meats. *Int. J. Refrig.* 134: 168-175.
- Hong GP. 2019. Application of high-pressure processing for developing novel meat freezing technology. *Anim. Food Sci. Ind.* 8: 35-42.
- Hu R, Zhang M, Jiang Q, Law CL. 2023. A novel infrared and microwave alternate thawing method for frozen pork: effect on thawing rate and products quality. *Meat sci.* 198: 109084.

- Hu R, Zhang M, Liu W, Mujumdar AS, Bai B. 2022. Novel synergistic freezing methods and technologies for enhanced food product quality: a critical review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 21: 1979-2001.
- Im JH, Nam JH, Ko AR, Jin HJ, Kim D, Kim CS, & Chun JY. 2022. Different blanching and thawing methods affect the qualities of potatoes and carrots: a study done at Jeju island. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 51: 600-610.
- Jeon KH, Heo SH, Kim YJ, Chun JY. 2023. Effect of cell alive system freezing on aged Hanwoo brisket during freezing storage. In: *Proceedings of 2023 KFN International Symposium and Annual Meeting*. October 18-20, Busan, Korea, p. 469.
- Jo YJ, Jang MY, Jung YK, Kim JH, Sim JB, Chun JY, Min SG. 2014. Effect of novel quick freezing techniques combined with different thawing processes on beef quality. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 34: 777-783.
- Kang HS, Chun JY. 2023. Effect of simulated refrigerated distribution environment on the quality of green lettuce and ground meat. *Food Eng. Prog.* 27: 19-30.
- Kim D, Nam JH, Hyun, JY, Kim CS, Chun JY. 2022. Physical characterization and manufacturing of frozen meal kit shredded radish using various freezing and thawing conditions. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 51: 600-610.
- Kim H, Chin KB. 2021. Physicochemical properties of reduced-salt cured pork loin as affected by different freezing temperature and storage periods. *Anim. Biosci.* 35: 494-502.
- Kim HW, Kim JH, Seo JK, Setyabrata D, Kim YHB. 2018. Effects of aging/freezing sequence and freezing rate on meat quality and oxidative stability of pork loins. *Meat Sci.* 139: 162-170.
- Kim HY, Kim GW, Park SY, Lee SH, Kang KM. 2021. Study on segmentation and utilization of Korean beef by cut. Korean Beef Promotion Management Committee, Korea.
- Kim J, Park SH, Choi DS, Choi SR, Kim YH, Lee SJ, Park JW. 2017. Effects of ultrasonic thawing on the physicochemical properties of frozen pork. *Food Sci. Preserv.* 24: 230-236.
- Kim KI, Lee SY, Hwang IG, Yoo SM, Min SG, Choi MJ. 2015. Quality characteristics of beef by different cooking methods for frozen home meal replacements. *Korean J. Food Sci. Anim. Resour.* 35: 441-448.
- Kim MJ. 2020. Quality parameters of dry-aged Hanwoo beef. Ph.D. thesis, Jeonbuk National University, Jeonbuk, Korea.
- Kim SJ. 2022. Effect of aging methods and time on microbiological safety and physicochemical properties of pork and beef. Master's thesis, Jeju National University, Jeju, Korea.
- Kim YB, Woo SM, Jeong JY, Ku SK, Jeong JW, Kum JS, Kim EM. 2013. Temperature changes during freezing and effect of physicochemical properties after thawing on meat by air blast and magnetic resonance quick freezing. *Food Sci. Anim. Resour.* 33: 763-771.
- Kim YHB, Kemp R, Shin DJ, Stuart A. 2024. Combined effects of different freezing and thawing rates on meat quality characteristics of aged lamb loins. *Meat Muscle Biol.* 8: 18259.
- Ko KB. 2011. Effect of magnetic fields freezing on pork quality traits. Master's thesis, Jeju National University, Jeju, Korea.
- Lee JS. 2020. Study on the aging period for improvement of quality characteristics in Hanwoo beef top round. Master's thesis, Chungbuk National University, Chungbuk, Korea.
- Leygonie C, Britz TJ, Hoffman LC. 2011. Oxidative stability of previously frozen ostrich *Muscularis iliofibularis* packaged under different modified atmospheric conditions. *Int. J. Food Sci. Technol.* 46: 1171-1178.
- Luo Y, Bi Y, Du R, Yuan H, Hou Y, Luo R. 2023. The impact of freezing methods on the quality, moisture distribution, microstructure, and flavor profile of hand-grabbed mutton during long-term frozen storage. *Food Res. Int.* 173: 113346.
- Meersman F, Smeller L, Heremans K. 2006. Protein stability and dynamics in the pressure-temperature plane. *Biochim. Biophys. Acta* 1764: 346-354.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). Food Codex General test method. Available from: https://www.foodsafetykorea.go.kr/foodcode/01_03.jsp?idx=11142. Accessed Jun. 15, 2024.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). Food Codex Standards and specifications for each food. Available from: <https://various.foodsafetykorea.go.kr/fsd/#/ext/Document/FC>. Accessed Dec. 31, 2024.
- Moon HS, Nam JH, Chun JY. 2021. Enhancement of unsaturated fatty acid on emulsion-type chicken sausage by using Jeju horse fat and canola oil. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 50: 1227-1238.
- Moon YH. 2013. Changes in physical properties of ham and loin from low-fat pork cuts during chilling after thawing. *J East Asian Soc. Diet. Life* 23: 487-495.
- Otero L, Rodríguez AC, Pérez-Mateos M, Sanz PD. 2016. Effects of magnetic fields on freezing: application to biological products. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 15: 646-667.
- Owada N. 2011. CAS technology; from storing fresh food to preserving medical resources. *Organ Biol.* 18: 71-78.
- Owada N, Kurita S. 2001. Super-quick freezing method and equipment. Japan patent 4041673.
- Park MH, Kwon JE, Kim SR, Won JH, Ji JY, Hwang IK, Kim MR. 2012. Physicochemical and microbiological properties of

- pork by various thawing methods. J. East Asian Soc. Diet. Life 22: 298-304.
- Park SH, Ryu HS, Hong GP, Min SG. 2006. Physical properties of frozen pork thawed by high pressure assisted thawing process. Food Sci. Technol. Int. 12: 347-352.
- Shim JB, Jo YJ, Choi MJ, Min SG, Yoo SM, Chun JY. 2015. Potential combination of various freezing and thawing techniques applicable for frozen storage of mushroom (*Lentinula edodes*). Food Eng. Prog. 19: 218-225.
- Shin JS. 2020. A study on the change of beef consumption and recognition of aged meat. J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc. 21: 373-379.
- Wierbicki E, Deatherage FE. 1958. Water content of meats, determination of water-holding capacity of fresh meats. J. Agric. Food Chem. 6: 387-392.
- Wilkinson C, Dijksterhuis GB, Minekus M. 2000. From food structure to texture. Trends Food Sci. Technol. 11: 442-450.
- Wu Z, Ma W, Xian Z, Liu Q, Hui A, Zhang W. 2021. The impact of quick-freezing methods on the quality, moisture distribution and microstructure of prepared ground pork during storage duration. Ultrason. Sonochem. 78: 105707.
- Yu LH, Lee ES, Jeong JY, Paik HD, Choi JH, Kim CJ. 2005. Effects of thawing temperature on the physicochemical properties of pre-rigor frozen chicken breast and leg muscles. Meat Sci. 71: 375-382.
- Zhang W, Wang Y, Zhu X, Cui B, Yang N. 2023. Influence of alternating magnetic field on the quality of beef and its protein during cold storage. Int. J. Food Sci. Technol. 58: 1741-1753.
- Zhang X, Gao T, Song L, Zhang L, Jiang Y, Li JL, Zhou GH. 2017. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast. Int. J. Food Sci. Technol. 52: 2097-2105.